

УДК 622.233.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ КАК УПРУГО-ФРИКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Шадрина, Л.А. Саруев

Томский политехнический университет

E-mail: avshadrina@rambler.ru

Рассмотрен процесс передачи энергии силовых импульсов через резьбовое соединение бурильных труб как упруго-фрикционную систему. Проведена оценка потерь энергии импульса на трение в резьбовых соединениях бурильных труб с помощью гистерезисных диаграмм. Получены упруго-деформирующие характеристики для трех типов соединений бурильных труб.

Анализ работы современных конструкций резьбовых соединений бурильных труб (муфтовых и ниппельных) показывает, что суммарные нагрузки, действующие в соединении, складываются из нагрузок, вызванных действием усилия предварительного поджатия, крутящего момента и нагрузок, возникающих при прохождении продольной волны [1]. Задача об определении нагрузок, вызванных действием осевого усилия и крутящего момента, подробно рассмотрена в [2].

Муфтовое (ниппельное) соединение бурильных труб можно рассматривать как упругую колебательную систему. Для описания диссипативных сил в ней будем использовать характеристику, представляющую зависимость диссипативной силы от скорости деформации упругого элемента [3].

Как известно, часто в конструкциях демпферов используют элементы сухого трения, характеристика которого имеет вид:

$$F_d = F_{тр} \cdot \text{sign } \dot{x},$$

где F_d — диссипативная сила; $F_{тр}$ — сила сухого трения; \dot{x} — скорость деформации элемента соединения.

Во многих случаях разделение полной силы на упругую и диссипативную силы является условным, а зачастую и вообще физически неосуществимым. Последняя относится, прежде всего, к силам внутреннего трения в материале упругого элемента и к силам конструкционного демпфирования, связанного с диссипацией энергии при деформации неподвижных соединений, в том числе резьбовых.

После прохождения импульса через резьбовое соединение бурильных труб последнее не возвращается полностью в исходное напряженное состояние из-за наличия сил неупругого сопротивления в резьбе. Закономерности изменения сил упругого и неупругого сопротивления исследованы на специальном стенде путем нагружения соединений в режиме «сжатие — растяжение» [4]. В результате получены упруго-деформирующие характеристики для четырех типов соединений бурильных труб.

Как уже отмечалось ранее, при ударно-вращательном бурении соединения труб находятся в условиях сложного динамического напряженного состояния.

Основываясь на экспериментальных [4] и литературных данных [3, 5], соединение бурильных труб

представляет собой упруго-фрикционную систему. При действии на соединение импульса в виде волны деформации происходит смещение труб относительно муфты. Работа, совершаемая силами трения, определяет основную величину потерь энергии импульса в соединении. Это подтверждается исследованиями, проведенными в лаборатории удара и вибрации ИГД им. А.А. Скочинского (г. Москва) и в Японии по передаче энергии удара через соединения бурильных труб, которые показали, что потери энергии ударного импульса происходят за счет:

- работы сил трения соединительных элементов о трубы;
- отражения волн от стыков труб.

Потери энергии по другим причинам пренебрежимо малы.

Результаты экспериментальных исследований современных конструкций бурильных труб показывают, что при сохранении постоянства сечения волнового по длине колонны отражения волн упругой деформации от соединений труб настолько малы, что ими также можно пренебречь. Проведенные эксперименты показали наличие нелинейности восстанавливающих и диссипативных сил [4].

Рассмотрим особенности процесса деформирования соединений труб по характерным участкам гистерезисной диаграммы, полученной в результате исследования работы резьбового соединения на стенде при квазистатическом нагружении.

Перед снятием диаграммы соединение нагружалось крутящим моментом, при этом происходила деформация резьбовых частей бурильных труб и соединительного элемента на величину, определяемую крутящим моментом. В начале цикла, когда сила сжатия меньше сил сцепления в витках резьбы жесткость соединения незначительна (рис. 1). При дальнейшем нагружении происходит сжатие бурильных труб и высвобождение муфты, трение покоя переходит в трение скольжения. Контакты витков оказывают все меньшее влияние на общую жесткость соединения, поэтому участок *бв* соответствует большей жесткости соединения. В начале процесса разгрузки сила трения имеет нулевое значение и участок *вк* соответствует только жесткости бурильных труб. В точке *к* сила сжатия становится равной силе высвобождения муфты, и при дальнейшем уменьшении силы происходит относи-

тельное скольжение витков труб и муфты. При этом появляется сила трения обратного знака. Жесткость соединения уменьшается.

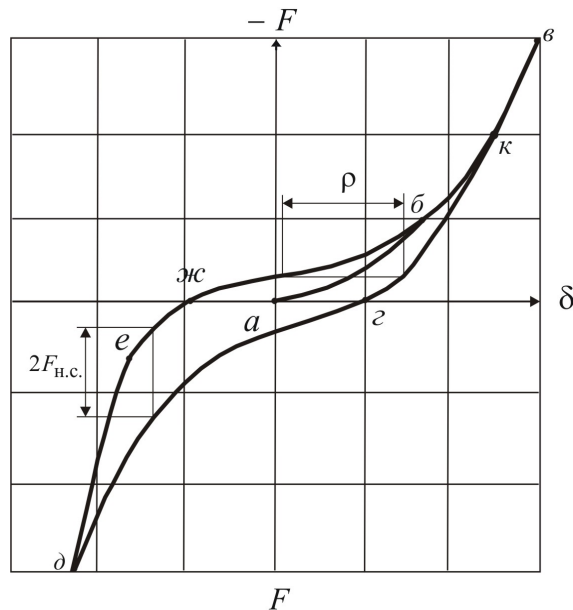


Рис. 1. Гистерезисная диаграмма при нагружении резьбового соединения буровых труб в режиме «сжатие – растяжение»: F – сила; $F_{н.с.}$ – сила неупругого сопротивления; δ – относительное смещение витков труб и муфты; ρ – смещение поперечного сечения трубы относительно муфты за цикл «сжатие – растяжение»

Участок $аг$ соответствует неупругой деформации соединения. При нагружении соединения растягивающей силой происходит растяжение муфты, сила трения в контакте витков увеличивается, и жесткость соединения также растет (участок $гд$). В точке $д$ сила неупругого сопротивления достигает положительного максимума. При смене знака появляется участок $де$, когда в соединении довольно малы относительные перемещения. Причем этот участок тем меньше, чем жестче упругий элемент, соединяющий буровые трубы, то есть чем жестче контакты витков резьбы труб и муфты. Дальнейшее уменьшение растягивающей силы приводит к возникновению значительных сил трения $F_{н.с.}$ в резьбе. В точке $ж$ растягивающая сила равна нулю. После цикла растяжения наблюдается неупругая деформация соединения на участке $жа$.

В последующем цикле сжатия на участке $жб$ жесткость значительно ниже первоначальной жесткости участка $аб$ вследствие того, что буровые трубы проходят путь $жб$ при смене знака трения в резьбе. Дальнейшее нагружение соединения (кривая $бвкг$) совпадает с начальной кривой нагружения. Цикл заканчивается.

Таким образом, при работе соединений буровых труб справедлив закон сухого трения, и энергия рассеивается за счет фрикционного взаимодействия контактируемых поверхностей.

Для подсчета средней силы неупругого сопротивления $F_{н.с.ср.}$ гистерезисная диаграмма разбива-

лась на определенное количество (12–15) участков вертикальными линиями и расчет производился согласно выражения:

$$F_{н.с.ср.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{н.с.i},$$

где $F_{н.с.i}$ – значение силы неупругого сопротивления на i -ом участке гистерезисной диаграммы при кусочно-линейной аппроксимации; n – число разбиений.

Площадь, ограниченная петлей гистерезиса, выражает энергию Ψ , рассеянную за один цикл деформирования и определяет работу диссипативных сил.

Динамическая характеристика упруго-диссипативного элемента, что представляет собой соединение буровых труб, имеет вид:

$$F(x, \dot{x}) = F_y(x) + F_d(\dot{x}),$$

где $F_y(x) = cx$ – линейная упругая составляющая, а c – жесткость упруго-диссипативного элемента.

Согласно [5] рассеянная энергия Ψ для элемента с сухим трением определяется следующим образом:

$$\Psi = 4x F_{тр.}$$

Рассеяние энергии при колебаниях упруго-диссипативной системы удобно оценивать с помощью коэффициента поглощения, равного отношению потерянной за цикл энергии Ψ к наибольшему значению потенциальной энергии $W_{п.}$ упругого элемента, определяемой при упругой линейной характеристике как:

$$W_{п.} = \frac{cx^2}{2}.$$

Коэффициент поглощения равен:

$$\phi = \frac{2\Psi}{cx^2}. \quad (1)$$

При периодических колебаниях вида:

$$x = a \cos \omega t,$$

где ω – круговая частота, диссипативные свойства которых заданы изложенным выше способом, исходную динамическую характеристику $F(x, \dot{x})$ заменяют эквивалентной упруго-вязкой моделью:

$$F(x, \dot{x}) \approx cx + R_d \dot{x},$$

где R_d – коэффициент эквивалентного вязкого сопротивления.

Этот прием приводит к линейным дифференциальным уравнениям движения, а от них – к системе нелинейных алгебраических уравнений, корни которых дают приближенные значения искомых амплитуд стационарных колебаний.

В приближенном расчете должна учитываться основная особенность фрикционной связи: при достаточно малых динамических нагрузках она работает как жесткая связь, при больших нагрузках – как демпфер сухого трения.

Линеаризация состоит в том, что фрикционные связи, в которых при заданном уровне нагрузки

имеет место скольжение, заменяются некоторыми эквивалентными демпферами вязкого трения. Причем, заменяются не все фрикционные связи: те связи, в которых скольжения нет, рассматриваются как жесткие [6].

Коэффициент R_d эквивалентного вязкого сопротивления подбирают так, чтобы исходная и заменяющая схемы обладали одинаковой поглощающей способностью. Энергия системы с вязким сопротивлением, рассеянная за цикл колебаний, определяется как [6]:

$$\Psi = \pi x^2 \omega R_d. \quad (2)$$

Согласно (1) исходный диссипативный элемент, имеющий коэффициент поглощения φ , рассеивает энергию:

$$\Psi = \frac{\varphi c x^2}{2}. \quad (3)$$

Приравнявая (2) и (3), получаем эквивалентный коэффициент вязкого сопротивления:

$$R_d = \frac{\varphi c}{2\pi\omega}.$$

Коэффициент поглощения φ для сухого трения определяется как:

$$\varphi = \frac{8F_{тр.}}{cx}.$$

Тогда коэффициент R_d

$$R_d = \frac{4F_{н.с.}}{\pi\omega x},$$

где $F_{н.с.}$ — сила неупругого сопротивления, определяемая экспериментально по гистерезисным диаграммам, Н; ω — круговая частота, определяемая длительностью импульса, c^{-1} ; x — амплитуда относительного смещения (бурильной трубы относительно соединительного элемента), м.

Проведены исследования зависимости средней силы неупругого сопротивления от величины приложенного крутящего момента для различных соединений бурильных труб (табл. (рис. 2).

Таблица. Параметры бурильных труб и резьбовых соединительных элементов

№ п/п	Тип соединения	Размеры муфт и нипеля, мм		Размеры труб, мм			Резьба круглая
		Диаметр	Длина	Наружн. диаметр	Внутр. диаметр	Длина	
1	Нипельное, А	25,5	122	33,5	24	1300	25×12
2	Муфтовое, Б	42	120	32	8	1200	31×12
3	Муфтовое, В	52	170	40	16	1000	38×12

Установлено, что при повышении крутящего момента интенсивность роста средней силы неупругого сопротивления для соединения В значительно выше, чем для соединений А и Б. Причем для нипельного соединения наблюдается максимум этой силы при крутящем моменте около 150 Н·м. Это объясняется особенностью силового нагружения контактов резьбы данного соедине-

ния, а также направлением поперечных деформаций резьбовых участков труб при прохождении импульса или приложении внешней силы сжатия. В нипельном соединении поперечная деформация резьбовых участков бурильных труб направлена от соединительного элемента, а в муфтовых — к соединительному элементу. В результате этого контактное давление и $F_{н.с.}$ в резьбе нипельного соединения после определенного значения крутящего момента снижаются.

$F_{н.с. ср.}, \text{ кН}$

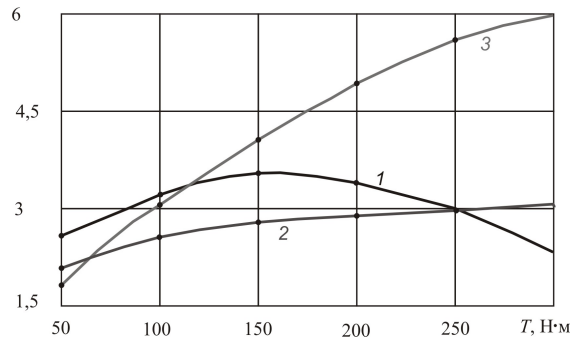


Рис. 2. Зависимость средней силы неупругого сопротивления $F_{н.с. ср.}$ от крутящего момента T : 1) нипельное (тип А); 2) муфтовое (тип Б); 3) муфтовое (тип В)

В муфтовом соединении с увеличением приложенного к нему крутящего момента контактное давление и $F_{н.с.}$ постоянно возрастают.

Нелинейность восстанавливающих сил можно учесть, если из общей жесткости соединения C_o выделить отдельные жесткости, влияющие на процесс передачи энергии удара: жесткость резьбовых частей бурильных труб $C_{тр.}$, жесткость соединительного элемента (муфты или нипеля) C_m и контактную жесткость C_k .

Учитывая, что эти жесткости соединены между собой по смешанной схеме, определены значения контактной жесткости соединений по выражению [7]:

$$C_k = \frac{C_m(C_o - C_{тр.})}{C_m + C_{тр.} - C_o}.$$

Упругие характеристики бурильных труб и соединительного элемента линейные:

$$P_{тр.} = C_{тр.}x,$$

$$P_m = C_mx.$$

Воспользовавшись способом эквивалентной линеаризации контактную упругую характеристику также можно принять линейной:

$$P_k = C_kx.$$

Таким образом, упругие и диссипативные характеристики для соединений бурильных труб можно рассматривать как линейные.

Графики изменения контактной жесткости и общей жесткости для трех типов соединений бурильных труб представлены соответственно на рис. 3 и 4.

С увеличением крутящего момента контактная жесткость соединений увеличивается, изменяясь

по параболическому закону. Качественный характер изменения контактной жесткости одинаков для соединений с круглым профилем резьбы, а разница в абсолютных значениях определяется величиной крутящего момента и геометрическими параметрами соединения.

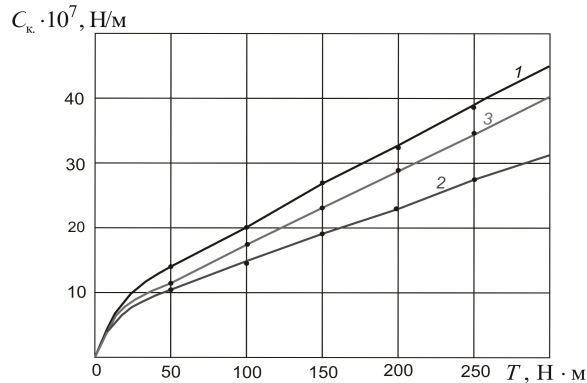


Рис. 3. Зависимость контактной жесткости соединения C_k от крутящего момента T : 1) ниппельное (тип А); 2) муфтовое (тип Б); 3) муфтовое (тип В)

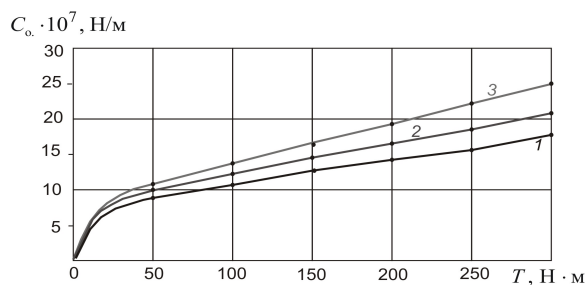


Рис. 4. Зависимость начальной (общей) жесткости C_0 соединения от крутящего момента T : 1) ниппельное (тип А); 2) муфтовое (тип Б); 3) муфтовое (тип В)

Жесткость стержня численно равна силе, приходящейся на единицу удлинения. Сравнительно высокая интенсивность роста и контактной и об-

щей жесткости до величины крутящего момента 25 Н·м можно объяснить следующим образом. Этот участок соответствует подготовительным процессам, когда происходит смятие на уровне шероховатостей в контактах витков резьбы, после чего наступает стабилизированный режим работы соединения в области действия закона Гука, т. е. равномерное изменение жесткости от величины крутящего момента.

Предельная величина крутящего момента задавалась в соответствии с реальными величинами, существующими в машинах ударно-вращательного действия. Например, для перфоратора ПК60А – 160 Н·м, для ПК75А – 255 Н·м. Исследование более широкого диапазона значения крутящего момента в задачи исследования не входило, однако можно предположить, что дальнейшее его увеличение приведет к резкому росту контактной жесткости, которая будет соизмерима с жесткостью муфты, что в дальнейшем неизбежно приведет к разрушению соединения.

Выводы

1. Коэффициент передачи энергии силовых импульсов по колонне бурильных труб повышается с увеличением жесткости резьбовых частей бурильных труб, контактной жесткости витков резьбы и снижением жесткости соединительных элементов.
2. Сила неупругого сопротивления в муфтовых соединениях с ростом крутящего момента непрерывно растет, а в ниппельных ее изменение носит экстремальный характер, что связано с различным направлением поперечной деформации резьбовых частей труб относительно соединительного элемента: в муфтовых соединениях поперечная деформация направлена к соединительному элементу, а в ниппельных – от него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
2. Биргер И.А., Иосилевич, Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 364 с.
3. Иванов М.Н. Детали машин. 5-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991. – 383 с.
4. Shadrina A.V., Saruev L.A. Analysis of energy loss on friction in carving connection of rods using of hysteresis diagrams // Наука и технология (KORUS-2003): Матер. VII Кореяско-Русского Междунар. симп. – Ульсан, 2003. – С. 118–122.
5. Вибрация в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (предс.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова, 1981. – 456 с.
6. Вибрация конструкций при сухом трении между элементами / Под ред. В.Г. Подольского. – Харьков: Изд-во «Прапор», 1970. – С. 85–106.
7. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – 2-е изд. испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 560 с.

Поступила 25.12.2007 г.